

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 06-341905  
 (43)Date of publication of application : 13.12.1994

(51)Int.Cl.

G01J 5/02  
 C23C 16/00  
 H01L 21/66

(21)Application number : 06-024471  
 (22)Date of filing : 22.02.1994

(71)Applicant : APPLIED MATERIALS INC  
 (72)Inventor : GRONET CHRISTIAN M  
 MINER GARY E

(30)Priority

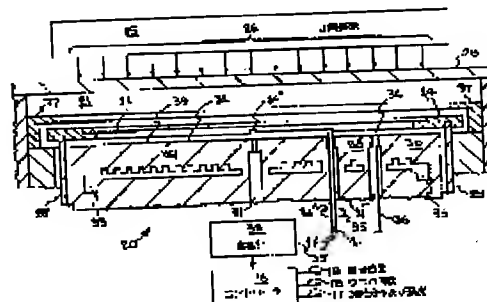
Priority number : 93 21840 Priority date : 24.02.1993 Priority country : US

## (54) WAFER TEMPERATURE MEASURING METHOD

(57)Abstract:

PURPOSE: To simply measure the temperature of an objective body at plural points and in a non-contact state by measuring heat radiation emitted from the body surface within a reflecting cavity formed between a body and a reflecting part arranged near to the body.

CONSTITUTION: Heat radiation emitted from a wafer (body) 22 is reflected within a reflecting cavity 32 formed between the wafer 22 and a reflecting part 30, and forms a radiation level surrounded. The radiation level within the cavity 32 becomes the function of wafer temperature, but does not depend on the radiation rate of the wafer 22 and the temperature of the reflecting part 30, part of the heat radiation surrounded within the cavity 32 is caught with an opening end 34 of a conduit 36, transmitted to a high temperature meter through an optical pipe (optical fiber) 35, and by measuring the heat radiation amount, the temperature of a wafer part adjacent to the opening end 34 can be measured. In order to successively arrange the other parts on the opening end 34 and measure the heat radiation amount, the wafer is rotated on the axis.



## LEGAL STATUS

19.02.2001

[Date of request for examination]  
 [Date of sending the examiner's decision of rejection]  
 [Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]  
 [Date of final disposal for application]  
 [Patent number]  
 [Date of registration]  
 [Number of appeal against examiner's decision of rejection]  
 [Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]  
 [Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2000 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平6-341905

(43) 公開日 平成6年(1994)12月13日

(51) Int. Cl. 5

識別記号

庁内整理番号

F I

技術表示箇所

G 0 1 J 5/02

C 2 3 C 16/00

H 0 1 L 21/66

T 7630-4 M

審査請求 未請求 請求項の数 3 8

O L

(全 1 2 頁)

(21) 出願番号 特願平6-24471

(22) 出願日 平成6年(1994)2月22日

(31) 優先権主張番号 08/021840

(32) 優先日 1993年2月24日

(33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 390040660

アプライド マテリアルズ インコーポレイテッド

APPLIED MATERIALS, INCORPORATED

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 950  
54 サンタ クララ パウアーズ アベニュー 3050

(72) 発明者 クリスチャン エム. グローネット

アメリカ合衆国, カリフォルニア州 9  
4070, サン カルロス, ヴァイオレット  
アヴェニュー 12

(74) 代理人 弁理士 長谷川 芳樹 (外3名)

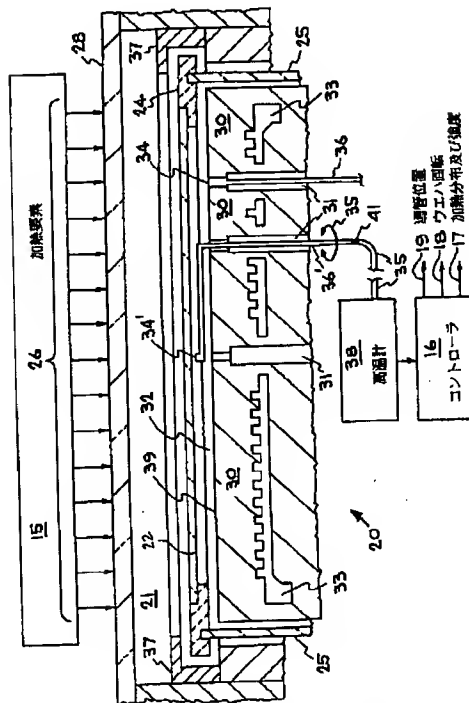
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ウエハ温度の測定方法

(57) 【要約】

【目的】 ウエハ 2 2 の温度を複数の点において非接触で測定する簡単な方法を得ることを目的とする。

【構成】 反射面 3 9 がウエハ 2 2 の表面から放出された熱放射をその表面の方に反射して戻すように、ウエハ 2 2 の表面と反射面 3 9 との間に反射キャビティ 3 2 を形成する反射部 3 0、及び、熱放射を測定し、測定された放射を用いてウエハ 2 2 の温度を決定する放射センサを備えている。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 反射部の反射面が物体の表面から放出された熱放射を前記表面の方に反射して戻すように、前記物体の前記表面と前記反射面との間に反射キャビティ(cavity)を形成する反射部、及び前記熱放射を測定(sampling)し、測定された放射(sampled radiation)を用いて前記物体の温度を決定する放射センサを備えた、前記物体の前記表面の温度を測定するための装置。

【請求項2】 前記反射面が前記物体の前記表面に接触しない請求項1記載の装置。

【請求項3】 前記表面から放出された熱放射が、前記反射面と前記物体の前記表面との間で繰り返し反射される請求項1記載の装置。

【請求項4】 前記反射面が前記物体の温度よりも実質的に低い温度まで冷却される請求項1記載の装置。

【請求項5】 前記反射面は微細構成(topography)を有し、前記物体の前記表面は微細構成を有し、これらの微細構成が局部的に平行になっている請求項1記載の装置。

【請求項6】 前記微細構成が実質的に平坦になっている請求項5記載の装置。

【請求項7】 前記反射面の幅が前記反射面と前記物体の前記表面との間の最大の距離よりも少なくとも20倍大きい請求項1記載の装置。

【請求項8】 前記反射キャビティ内から受信端(receiving end)で熱放射を集め、集められた熱放射を離れて配置された測定装置に運ぶ導光性導管(light conductive conduit)を前記センサが備えた請求項1記載の装置。

【請求項9】 前記導管が、前記反射面を通して前記反射キャビティを貫通している請求項8記載の装置。

【請求項10】 前記導管が、前記導管の受信端を前記物体に対して動かすアクチュエータに結合されている(is coupled to)請求項8記載の装置。

【請求項11】 前記導管が曲げられており、前記アクチュエータが前記導管を回転させることによって前記導管の受信端を動かす請求項10記載の装置。

【請求項12】 前記放射センサが、前記物体の前記表面に近い位置からの光を集める請求項1記載の装置。

【請求項13】 前記放射センサが、前記反射キャビティ内の異なる位置からの放射を測定するために適用される請求項1記載の装置。

【請求項14】 ウエハの表面と反射部の反射面との間に反射キャビティを形成するために、チャンパ内に配置され前記ウエハに対面する反射部であって、前記反射部は前記ウエハの前記表面から放出された熱放射を反射するもの、及び前記熱放射を測定し、測定された放射を用いて前記ウエハの温度を決定する放射センサを備えた、半導体ウエハ処理チャンパ内の半導体ウエハの温度を測

定するための装置。

【請求項15】 前記反射部が前記ウエハの前記表面と接触しない請求項14記載の装置。

【請求項16】 前記熱放射が前記反射面と前記ウエハの前記表面との間で繰り返し反射される請求項14記載の装置。

【請求項17】 前記反射面が前記ウエハの温度よりも実質的に低い温度に冷却される請求項14記載の装置。

【請求項18】 前記反射面は微細構成を有し、前記物体の前記表面は微細構成を有し、これらの微細構成が局部的に平行になっている請求項14記載の装置。

【請求項19】 前記微細構成が実質的に平坦になっている請求項18記載の装置。

【請求項20】 前記反射面が前記ウエハの前記表面と接触せず、前記反射面の幅が前記反射面と前記ウエハの前記表面との間の最大の距離よりも少なくとも20倍大きい請求項14記載の装置。

【請求項21】 前記反射キャビティ内から受信端で熱放射を集めて、集められた熱放射を離れて配置された測定装置に運ぶ導光性導管を前記センサが備えた請求項14記載の装置。

【請求項22】 前記導管が、前記反射面を通して前記反射キャビティを貫通している請求項21記載の装置。

【請求項23】 前記導管が、前記導管の受信端を前記ウエハに対して動かすアクチュエータに結合された請求項21記載の装置。

【請求項24】 前記導管が曲げられており、前記アクチュエータが前記導管を回転させることによって前記導管の受信端を動かす請求項23記載の装置。

【請求項25】 前記放射センサが前記ウエハ上の異なる位置からの放射を測定する請求項14記載の装置。

【請求項26】 半導体ウエハを加熱するための加熱要素であって、複数の制御可能な放射エネルギー源を有し、各前記放射エネルギー源は前記ウエハの表面領域の一部に照射するもの、及び前記放射エネルギー源の少なくとも一つの部分群(sub-group)からの照射の強度を個々に制御するコントローラであって、前記放射エネルギー源が前記ウエハ上の異なる位置で前記放射センサによって検出された熱放射量に関して制御されるように、前記放射センサに結合されたものをさらに備えた請求項14記載の装置。

【請求項27】 前記ウエハの回りに配置され、前記放射エネルギー源からの放射が前記反射キャビティ内に入るのを制限する隔壁(baffles)をさらに備えた請求項26記載の装置。

【請求項28】 前記放射センサが対物レンズを備えた請求項14記載の装置。

【請求項29】 前記ウエハの前記表面の近くに配置された導光性導管を前記放射センサが備えた請求項14記載の装置。

【請求項30】 前記導光性導管が、反射する内面を有する開口チューブを備えた請求項29記載の装置。

【請求項31】 前記導管によって集められた熱放射を測定するための高温計を前記放射センサがさらに備えた請求項29記載の装置。

【請求項32】 前記ウエハが透明にならない波長帯に前記高温計が感応する請求項31記載の装置。

【請求項33】 反射部の反射面が物体の表面から放出された熱放射を反射して前記表面に戻すように、前記表面と前記反射面との間に反射キャビティを形成するため10に前記反射部を配置するステップ、

前記反射キャビティ内の熱放射を測定するステップ、及び測定された放射から前記物体の温度を決定するステップを備えた、前記物体の前記表面から放出された熱放射から前記物体の温度を測定する方法。

【請求項34】 前記物体の温度よりも実質的に低い温度に前記反射面を冷却するステップをさらに備えた請求項33記載の方法。

【請求項35】 前記物体の前記表面に近い位置から前記熱放射が測定される請求項33記載の方法。20

【請求項36】 前記反射キャビティ内の複数の異なる点から前記熱放射が測定される請求項33記載の方法。

【請求項37】 前記物体の前記表面の領域を走査 (scanning) することによって前記熱放射が測定される請求項36記載の方法。

【請求項38】 前記物体を加熱するステップ、及び前記決定された温度に応じて前記加熱するステップを制御

$$I_{T,\lambda} = \sigma \cdot e(\lambda) \cdot T^4,$$

【0006】ここに、 $I_{T,\lambda}$  は波長 $\lambda$ において秒あたり $\text{cm}^2$ あたりに絶対温度 $T$ の面から放出される全放射、 $e(\lambda)$ は放射面の性質に依存して波長 $\lambda$ の関数として0から1の範囲にある、放射率と呼ばれる定数、及び $\sigma = 0.0567 \times 10^{-4} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{deg}^{-4} \cdot \text{sec}^{-1}$  (ステファン-ボルツマンの定数)である。ステファン-ボルツマンの定数のもっと詳しい説明は、Heat and Thermodynamics; Zemansky, M.W.; McGraw Hill 及び Fundamentals of Modern Physics; Eisberg R.M.; John Wiley and Sons のような教科書に見られる。

【0007】もし対象物の放射率が与えられた波長または波長範囲において既知であるなら、ステファン-ボルツマンの関係は、それらの波長において (他の光を集めずに) 対象物から放出された光を集め、この光の強度を高温計またはラジオメータ (radiometer) のような検出器で測定することによって、対象物の温度を測定するのに用いる。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】しかし、残念ながら対象物の放射率はしばしば既知ではない。例えばシリコンウエハの放射率はウエハからウエハにわたり広範囲に変

するステップをさらに備えた請求項33記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】この発明は、ウエハ処理チャンバ内の半導体ウエハの温度測定方法に関する。

【0002】

【従来の技術】多くの製造処理、例えば半導体ウエハの処理においては、高品質は、対象物 (workpiece) (例えばウエハ) の温度が厳しく制御されたときにのみ達成されうる。しかし、対象物に物理的に接触することなく温度測定が行われなければならない状況が多い。例えば、処理中のウエハは熱ブロープの接触によって汚染される。従って、対象物に接触することなく温度を測定する方法が必要とされる。

【0003】非接触で温度を測定するための一つの既知の方法は、熱放射に基づくものである。絶対零度より高い温度にあるすべての物体は広い帯域の熱放射を放っている。約500℃よりも低い温度においては、ほとんどの放射は赤外であるが、高温においては可視光が放射される。

【0004】単位面積あたりの放射の放出率は、波長の全スペクトルについて積算され、表面温度の上昇に従って増加する。放射と与えられた波長における温度との関係は、以下のステファン-ボルツマン (Stefan-Boltzmann) の式によって表される。

【0005】

【数1】

(1)

30 動することが知られており、そのため、上記の技術をウエハ温度を測定するのに用いるためには各ウエハの放射率を分離して測定することが要求される。さらに、ウエハ製造処理において高温にされたウエハの放射率は、室温で測定されるウエハの放射率とは異なることがわかっている。この結果、放射率の測定は処理中に行われなければならない、ウエハ温度を測定するための上記技術を用いることを困難にしている。

40 【0009】米国特許第4,823,291号 (バーマン (Berman)) は、処理中のウエハの放射率 $e_w$ を計算することにより、シリコンウエハの温度を測定する装置について記述している。ウエハを透過しウエハによって反射される光エネルギーの量が分離して測定されるように、ウエハは光源によって照明される。ウエハの透過率 $t_w$  (すなわち、直接または拡散した形でウエハを透過する、入射する光エネルギーの部分) 及びウエハの反射率 $r_w$  (すなわち、直接または拡散した形でウエハによって反射される、入射する光エネルギーの部分) が計算され、ウエハの吸収率 $a_w$  (すなわち、ウエハによって吸収される、入射する光エネルギーの部分) を、以下のエネルギー式の保存50から導くために用いられる。

【0010】

\* \* 【数2】

$$t_w + r_w + a_w = 1$$

(2)

【0011】そして、放射率  $e_w$  が、以下の式で示されるキルヒホッフ (Kirchoff) の熱力学の法則によって得られる。

※ 【0012】  
【数3】

$$\frac{e_w}{a_w} = 1$$

(3)

【0013】この方法の欠点は、複数の光検出器、ビームスプリッタ、光源及び集光システムを含む複雑な装置、及び光源の出力をモニターする制御ループが必要なことである。さらなる欠点は、正しい動作のためには、ウエハの面が正反射面でなければならないことである。すなわち、反射角が入射角に等しくなるように入射光を反射しなければならないことである。典型的なウエハ面は拡散反射をするが、もし拡散反射するウエハが用いられた場合には、反射光は処理チャンバ内に分散され、反射光を集めるとともにウエハ処理もできるような処理チャンバを設計するのを困難にする。

【0014】米国特許第4,533,243号(ズーコフ(Zhukov)ら)は液体金属の温度を測定する方法について記述している。球根状の端部を有する光パイプが、溶融した金属に接触して配置されている。溶融した金属からの熱放射は球根状端部に至り、光パイプを下がってそこで高温計によって測定される。

【0015】この方法の欠点は光パイプを溶融した金属に接触させなければならない点であり、これによりこの方法は、半導体処理のような非接触の応用には適しない。

【0016】従って、対象物の温度を複数の点で測定するための、簡単な非接触の方法に対する要求がある。

【0017】

【課題を解決するための手段】この発明は、一面では、物体表面の温度を測定するための装置及び方法であることを特徴とする。物体の近くに反射部が配置されて、物体と反射部との間に反射キャビティが形成され、物体表面で放出された熱放射は反射して物体の方に戻される。物体から放出されたすべての熱放射は、反射して物体の方に戻るため、反射キャビティ内の熱放射の強度は物体表面の放射率の関数にはならない。この結果、反射キャビティ内の熱放射を測る放射センサは物体の温度を従来可能であった方法よりも正確に決定することができる。

【0018】上記装置及び方法は多くの応用例に用いることができるが、以下では半導体処理チャンバ内の半導体ウエハの温度測定に関して説明する。この実施例及び他の実施例において、反射部は物体表面に接触せず、反射部の表面形状は物体表面に対して部分的に平行であり(例えば両方が平面)、そのため物体から放出された熱放射は物体と反射部との間で繰り返し反射する。この目

標は、反射部と物体の間の距離に対して少なくとも20倍以上広い反射部を選択することによっても推進される。

【0019】物体が高温になる応用においては、高温が反射部の反射率に影響しないように、反射部を前記物体の温度よりも実質的に低い温度まで冷却することもある。

【0020】半導体処理及び他の応用例においては、導光性導管(light conductive conduit)(例えば、反射部の小さな穴を通して反射キャビティ内に挿入されたもの)を用いて反射キャビティからの熱放射を集め、集められた熱放射を離れて配置された高温計に運ぶことも有用である。物体の種々の位置の温度を測定するために、導管は、物体に対して相対的に移動させるアクチュエータに接続されていてもよい。導管は光ファイバや結晶であってもよいし、反射する内面を有する開口チューブであってもよいし、鏡とレンズから成るシステムであってもよい。

【0021】半導体処理の実施例においては、上記の装置は、ウエハ面に沿った種々の点においてウエハの温度を制御するフィードバックループとともに用いうる。この実施例は、ウエハの異なる領域を個々に加熱する加熱要素、例えば、複数の制御可能な放射エネルギー源(各源はウエハの表面領域の一部を照射する)を有する加熱要素を用いている。コントローラは、各放射エネルギー源からの照射強度を、ウエハの対応する位置で検出された熱放射量に応じて個々に制御する。

【0022】

【実施例】この発明の動作原理を説明するために、図1(a)に示したような、キャビティ内の放射パターンを考慮することが有益である。キャビティ10の壁は、無限で平行であるとモデル化される。上部壁11は、透過率(transmissivity)  $t=0$ 、放射率(emissivity)  $e$ 、及び吸光率(absorptivity)  $a$ を有している。下部壁12は、反射率(reflectivity)  $r=1$ 、及びゼロの透過率、放射率及び吸光率を有している。

【0023】キャビティ10の上部壁11からは、熱放射(thermal radiation)がランダムなパターンで放射される。この放射は、下部壁12で反射し、その後、上部壁11で部分的に反射され部分的に吸収される。上部壁11で反射される部分は、その後、再び下部壁12で

反射され、その後、上部壁11で部分的に反射され部分的に吸収される。このパターンは、図1(a)に部分的に描かれた典型的な光線によって図示されている。

【0024】この例のために、上部壁11は拡散反射面(diffuse reflector)、すなわち入射光は異なる角度及び異なる強度で反射され、上部壁11は均一温度Tであると仮定する。また、下部壁12は正反射面(specular reflector)であると仮定する。(各壁が拡散または正反射面である必要はなく、単に下部壁12が反射率1を有し、両方の壁が透過率0を有すればよいことに注意されたい。) 光は、上部壁11によってランダムなパターンで放射され、キャビティ10の全体に渡って等しくランダムな(等方性の)パターンで反射されるため、与えられた時間に渡り下部壁12の与えられた点ではほぼ等しい量の光が反射する。下部壁12の与えられた場所、例えば14で反射する光は、数個の区分に分けることができる。上部壁11でまだ部分的に反射していない光(0-反射光、例えば13a)、上部壁11で1回部分的に反射した光(1-反射光、例えば13b及び13c)、

\* c)、上部壁11で2回部分的に反射した光(2-反射光、例えば13d)、等である。キャビティ10内の光のランダムな分布のために、各区分の光が均一な空間分布をもって下部壁12に発せられ、それゆえ、下部壁12の与えられた点に入射する全部の光は、各区分の光を含むであろう。

【0025】光が上部壁11で反射するたびに、光の一部は上部壁11によって吸収される。残りの光は上部壁11で反射し、反射光のエネルギーは係数 $1-a$ によって減少する。従って、上部壁11に入射する波長 $\lambda$ の0-反射光が、(ステファン-ボルツマン(Stefan-Boltzmann)の式による) $\sigma e(\lambda) T^4$ に等しい強度をもっているとすると、1-反射光は $\sigma e(\lambda) T^4 (1-a)$ に等しい強度をもち、2-反射光は $\sigma e(\lambda) T^4 (1-a)^2$ に等しい強度をもち、以下同様となる。従って、下部壁12の与えられた場所に入射する光のトータルの強度 $I_T$ は、以下の無限級数に等しい:

【0026】

【数4】

$$I_{T,1} = \sigma e(\lambda) T^4 + \sigma e(\lambda) T^4 (1-a) + \sigma e(\lambda) T^4 (1-a)^2 + \dots$$

$$= \sigma e(\lambda) T^4 \left[ \sum_{n=0}^{\infty} (1-a)^n \right]$$

(4)

【0027】この級数の和は以下の値になる:

※【数5】

【0028】

※

$$I_T = \sigma e(\lambda) T^4 \left[ \frac{1}{a} \right]$$

(5)

【0029】しかし、キルヒホッフ(Kirchoff)の法則

★【0030】

$e=a$ によって、代入することによりこの式は以下のよ

30 【数6】

うになる。

★

$$I_T = \sigma e(\lambda) T^4 \left[ \frac{1}{a(\lambda)} \right] = \sigma e(\lambda) T^4 \left[ \frac{1}{e(\lambda)} \right] = \sigma T^4$$

(6)

【0031】従って、下部壁12上の任意の点に入射する波長 $\lambda$ のトータルの入射光は $T^4$ に比例し、これはキャビティ壁の放射率 $e$ によらない比例となる。他の方法で考察すると、キャビティ10内のトータルの光強度は、上部壁11が“黒体(black body)”、すなわち上部壁11放射率 $e$ が1であるとした場合と同じになる。つまり、もし $e_{wall}=1$ (それゆえキルヒホッフの法則により $a_{wall}=1$ )であるなら、式(4)の無限級数の第1項は $\sigma T^4$ になり、 $a_{wall}=1$ であって上部壁11に入る全ての光は吸収されてしまい1-反射光がなくなる(また、他の $n$ -反射光も)ため、式(4)の残りの項はゼロになる。

【0032】式(4)の無限級数の最初の数項が、(ほとんどの和を有する無限級数と同様に)支配的な項であることに注意されたい。さらに、これらの最初の数項は

0-反射、1-反射、2-反射等の光に対応し、それらは主に上部壁11上の近い場所から発せられる。この結果、式(4)の無限級数の値は、熱放射を測る点の近くにある上部壁11の場所の温度によって主に決定される。

【0033】従って、上部壁11の温度が空間的に均一であると仮定する必要はない。上部壁11の温度が空間的に変動する場合においてさえ(変動が比較的ゆっくりで連続的である限り)、式(4)の級数は式(5)の和に実質的に等しく、その結果、キャビティ10内の与えられた場所で測られる放射は、上部壁11の放射率からはおお独立であろう。

【0034】さらに、上部壁11の温度が空間的に変動すると仮定した場合でも、キャビティ10内の任意の場所の光を測ることにより(たとえば、開口部14を通し

てキャビティ10内に入れられた光ファイバによって、計測点の近くの場所の上部壁11の温度は、上部壁11の放射率にはよらずに決定される。

【0035】下部壁12の与えられた場所において、上部壁11上の近い点から発せられた0-反射、1-反射、及び2-反射光は、壁面に直角に近い角度で到達しやすいことにも注意されたい。反対に、上部壁11上の遠い点から発せられた光は、直角とは大きく異なる角度で到達しやすい。(この考察は、0-反射光については明らかに正しく、発生源の距離と入射角との関係は反射回数によって急速に弱くなるが、1-反射光及び2-反射光についてはほぼ正しい。)前段落の考察により、

(例えば開口部14から光を集めることによる)温度測定を、直角とは大きく異なる角度で到達する光を捨てることにより、さらに局所的に制限しうることが明らかである。従って、狭いまたは広い受光角度を有する放射センサを選択することにより、温度測定はそれぞれ大きく局所化されるかまたは緩く局所化される。

【0036】さらに、放射率及び吸収率が比較的高い、例えば0.7あるいはそれ以上の場合においては、上部壁11により近い場所の放射を集めることにより温度計測をもっと局所化することが可能である。これは、放射率及び吸収率が比較的高いときには、0-反射光に対応する第1項によって式4が支配されるからである。このような状況では、放射センサが上部壁11のより近くに配置されているなら、それは局所的な0-反射放射のみを集め(遠い場所からの0-反射光は、センサにセンサ受光角を超える角度で入る)、それゆえ結果としての温度測定はもっと局所化されるであろう。

【0037】最後に、下部壁12は熱放射が測られる波長において反射することのみが必要であることに注意されたい。他の波長における反射率は重要ではない。このことは、式(4)の無限級数の項は1つの波長( $\lambda$ )において光強度をモデル化しているために正しい。他の波長における強度は、級数には関連せず、式(5)及び(6)の和には影響しない。上部壁11に入射した波長 $\lambda$ の熱放射の一部は吸収された後に異なる波長の放射として再放射されるけれども、式(4)は上部壁11によって吸収される放射を考慮していないため、この効果は式(4)には関連しない。その代わり、式(4)は上部壁11で反射した放射を考慮し、反射した放射は入射した放射と同じ波長 $\lambda$ になるであろう。

【0038】上記に適用した理由は、図1(a)に示したような無限の平行板の間のキャビティには限定されない。同じ理由は、キャビティの物理的配置がキャビティ全体に渡ってキャビティ壁から発せられる熱放射をランダムに(等方的に)分布させるように作用するから、(a)部分的に均一な温度及びゼロより大きい放射率、または(b)単位量の反射率を有する壁を備えた(有限または無限のサイズの)任意のキャビティに適用され

る。一つのそのようなキャビティ10'が図1(b)に示されている。キャビティの壁は、単位量の反射率とゼロの放射率、透過率、及び吸収率を有する領域12'、及びゼロの透過率を有するがゼロでない反射率、放射率及び吸収率を有する領域11'を備える。もし領域11'の各々が同じ温度及び放射率を有しており、配置が熱放射をキャビティ10'全体に渡ってランダムに(等方的に)反射し分布させれば、キャビティ10'の壁上の各点は等しい量の1-反射、2-反射、3-反射等の光によって照されるであろう。結果として、例えば開口部14'への入射光は式(4)の無限級数に等しくなり、それゆえ、開口部14への入射光は領域11'の内面の温度に依存するが、領域11'を構成する材料の放射率には依存しないであろう。

【0039】前述の原理は、放射率に依存しない非接触型の温度測定装置を形成するのに用いる。例えば、図1(a)を参照して説明したタイプのキャビティは、半導体ウエハの温度を測定するのに用いる。この原理を用いた半導体処理チャンバが図2に示されている。

【0040】総括的に20で指示される図2の半導体処理装置は、円筒形の処理チャンバ21(断面で示されている)を備えており、その中には、例えばディスク形状の8インチ(200mm)の直径のウエハ22が搭載されている。ウエハ22は、ウエハの真上に配置された加熱要素15によって加熱される。加熱要素15は放射されるエネルギーである光26を発生し、光26は、ウエハの約1インチ(2.5cm)上方にある石英窓(quartz window)28を通った後、処理チャンバ21に入る。好適な加熱要素15は、この出願の優先権の基礎となった米国出願の譲り受け人に譲渡された米国特許第5,155,336号に開示されている。そこで開示されている加熱要素は、光を集めて平行にし、平行光を処理チャンバ21内に向かわせる187個の光パイプを使用している。187個の光パイプは、半径方向に対称に配置される12グループに分けられる。それらのグループは、下方のウエハ22の異なる領域に向かう光の強度を制御するために、個々に調整される。

【0041】水冷の反射部30が、ウエハ22と反射部30との間に反射キャビティ32を形成するために、ウエハ22の下方に配置される。ウエハ22から発せられた熱放射は、このキャビティ32内で反射し、包囲する放射レベルを形成する。図1のキャビティ10のように、キャビティ32内の放射レベルはウエハ温度の関数になるが、ウエハ22の放射率及び反射部の温度には依存しない。反射部30の反射面39は、よく磨かれた安定な反射面から作られている。面39の反射率が100%に近づくにしたがい、キャビティ32の振る舞いは図1(a)の理想的なモデルにより近くなる。最も反射する既知の面は金である。従って、一つの実施例においては、反射面は石英板の内部にシールされた金箔である。



しかし、半導体処理チャンバ内で金を使用することは汚染のリスクを増加させる、あるいは増加させるように見える。ニッケルは金よりも不活性であり、ステンレス鋼よりも少しだけ高い反射率を有している。それゆえ、ニッケルをめっきした (plated) ステンレス鋼が現在では好まれている。しかし、与えられる波長によっては、金、ニッケルまたはステンレス鋼以外の面が最高の反射率をもつこともある。

【0042】キャビティ32の幅-高さ比が増加したときに、図1(a)のキャビティ10は図2のキャビティ32に対するもっと正確なモデルになることが、実験モデルによって示された。従って、キャビティ32を図1(a)の理想的モデルに近づけるためには、ウエハ22と反射部30との距離を最小にすることが望ましい。図2に示された実施例においては、ウエハは8インチの直径を有しており、ウエハと反射部との距離は約、3インチ(7.6mm)であり、従ってキャビティ32の幅-高さ比は8/3すなわち2.7である(ウエハ22と反射部30との距離は、以下に説明する”曲げられた導管(conduit)”の実施例においてはもっと大きく、例えば、3.5インチ(8.9mm)であり、以下に説明する”真っ直ぐな導管”の実施例においてはもっと小さく、例えば、2.5インチ(6.4mm)である)。どんな場合でも、少なくとも20の幅-高さ比が好ましい。

【0043】ウエハ22の温度を測定するために、キャビティ32内に包囲された放射の一部は固定された導管36の開口端34に捕えられ、導管の他端に連通される。この他端において放射は、柔軟な光パイプ35(すなわち光ファイバ)につながれ、光パイプ35は熱放射を放射に感応する高温計(pyrometer)38まで約10フィート(3m)運ぶ。高温計38は、受け取った熱放射の量を決定し、これにより導管の開口端34に隣接するウエハの部分の温度を決定する。以下に記述されるように、ウエハは、ウエハの他の部分を開口端34上に配置するために、その軸のまわりに回転させられる。

【0044】導管には2つの実施例が考えられ、それらは両方とも図2に示されている。

【0045】第1の実施例においては、36'で指示するように導管は真っ直ぐであり、反射部30内の固定位置に配置されている。真っ直ぐな導管の開口端34は、反射部30の面と実質的に同一平面に配置される。この実施例において、導管の受け入れ角は比較的広く、例えば52°(実験的に測定されたもの)である。この結果、高温計はウエハ22の下側の比較的大きな領域の温度を読み取ることになる。もしウエハのより小さい領域の測定が好ましいなら、小さい受け入れ角を有する導管を使用しうるし、または(上述のように、もし状況が許すなら)導管はウエハの下側のより近くに移動させられる。しかし、これらの方法は両方とも、信号レベル、それゆえ検出器における信号-ノイズ比を減少させるこ

ともなる。

【0046】他の実施例においては、複数の真っ直ぐな導管が反射キャビティ内に突出しており、各導管がウエハ22下側の異なる場所から熱放射を測る。好ましくは、これらの導管は、各導管の測定を局所化するために、一つの導管の場合よりも狭い受け入れ角をもつ。放射測定の各値は個々の専用の高温計に移され、高温計は、これらの高温計が個々に割り当てられたウエハの領域の温度を測定する。このデータから、ウエハの放射帯(radial bands)の温度曲線(profile)が、ウエハを回転させることより計算されうる。例示のために、導管を受け入れうる3つの開口部31が図2に示されている。導管及び開口部が比較的少ししかなく各導管及び開口部の断面積が比較的小さいかぎり、一つの導管または開口部で失われる(すなわち、反射されない)少量の熱放射は、他の導管による温度測定の妥当性には、実質的に逆に影響しないことを実験データは示している。

【0047】ウエハの端部と中心との間を横方向に動かされうる一つの導管36を設けることも可能である。この場合でも、導管は固定された一つの導管よりも狭い受け入れ角をもちうる。導管がこの経路を動くのにしたがって、計測時に導管36の端部34のほぼ上方にある特定の領域の温度を決定するために、放射エネルギーが連続的に測られて処理される。そして、この測定された温度は、計測位置と関係付けられ、ウエハの放射帯の温度曲線がウエハを回転させることによってプロットされる。導管36をこの経路に沿って動かすために、溝(slot)(図示せず)が水冷の反射部30の本体に形成されている。この溝は導管36のガイドとして機能する。導管36に対して好適に取り付けることにより、任意の特定の時刻におけるその端部34の正確な位置は、決定されることができ、その時刻のウエハ22の回転位置と関係付けることにより、ウエハ下側の特定の位置に合わせうる。

【0048】他の実施例においては、導管36'は曲った形状をしており、水平な中間部分によって結ばれた2つの垂直な端部を有している。導管36'はアクチュエータ(図示せず)に結合されており、アクチュエータは導管を360°の円弧に沿って矢印35で示される方向に回転させる。(柔軟な光パイプ35は、—これは導管36'に堅固に取り付けられている—導管36'がこの360°の円弧に沿って回転する際に、どちらの方向にねじるにも十分な弾性を有している。)この実施例において、開放端34'はウエハ22の下面の比較的近くに(例えば、100分の4インチ)配置されており、従ってウエハ22と反射部30との間の距離を最小にすることができる。導管36は好ましくは、単結晶サファイア(single sapphire crystal)のような耐熱性で耐食性の材料から形成されている。サファイアの導管はうまく用いられているが、光ファイバの他の形態、反射す



る内面を有する開口パイプも、熱放射をキャビティ32から高温計38まで連通させるために、効果的に使用することができることは明らかである。他の例は、反射部30に取り付けられた小さな半径の対物レンズを含む光学系と、レンズによって集められた放射を高温計に連通（光ファイバによることが可能である）させる鏡及びレンズのシステムとを用いるものである。これらの他の実施例は、適当なサイズと光学特性を有する既製の光要素が見つかったなら、サファイアの導管よりも低価格であろう。

【0049】光パイプ35は、例えば、反射コーティングに包まれた少し柔軟な石英ファイバを含んでもよい。それは、導管及び光パイプの端部をお互いが接触した状態または接触に近い状態に正確に制御された位置で保持する市販のファイバカブラ41によって、導管に接続される。導管及び光パイプの端部の間に隙間があると、導管に極端な角度で入った光は（導管内で反射した後）導管を極端な角度で出て行くであろうから、それは導管の受け入れ角に影響を及ぼすであろうし、それゆえ、光パイプにうまく接続されないであろう。従って、導管の受け入れ角は、導管及び光パイプをそれらを適当な距離だけ離して位置決めするカブラ41を選択することにより調整されうであろう。

【0050】好適な石英ファイバ光パイプ、サファイア結晶導管、及び光パイプ／導管カブラは、Luxtron Corporation-Accufiber Division, 9550 S.W. Nimbus Avenue, Beaverton, OR 97005. から入手可能である。

【0051】ウエハ22は、その端部を約1インチ（2.5cm）の半径方向の幅を有するガードリング24によって支持されている。ウエハ22の汚染を最小にするために、ガードリング24はシリコンから作られている。ガードリングは、回転するチューブ状の円柱体25の上に載せられており、円柱体25はアクチュエータ（図示せず）に接続されている。アクチュエータは円柱体25を回転させ、これによりガードリング24及びウエハ22を回転させる。円柱体25は、好ましくは比較的耐熱性で比較的不活性の物質、例えば石英から作られている。

【0052】半導体ウエハ処理において、ウエハは、その表面に沿って制御された温度曲線を有していることが重要である。前述のように、加熱要素15は、ウエハ22の上面の特定領域を照明する光パイプのグループからの光26の強度を制御しうる。これらの放射エネルギーの制御は、それゆえ、ウエハ22の温度曲線を制御し決定するのに寄与する。

【0053】ウエハ22の温度曲線を決定するために、コントローラ16が（線18を通して）ウエハアクチュエータ、及び／または、（線19を通して）導管アクチュエータを制御し、ウエハ22の下面の異なる多くの場所の温度を測定する。ウエハを回転させることにより、

ウエハの種々の場所の温度が測定される。真っ直ぐな導管の実施例においては、ウエハを回転させることによって選択された角度領域が導管端部34上に位置決めされるようにすることができ、導管は選択された角度領域からの放射を捕える。こうして、高温計38は選択された角度領域の温度を計測する。曲った導管の実施例においては、ウエハの回転を導管の回転と組み合わせることによって、導管端部34'上に任意の局所化された領域をもってすることができ、従って高温計38は任意の所望の局所化された領域の温度を測定することができる。

【0054】ウエハの温度曲線が計測されると、コントローラは所望の温度曲線からの偏差を記録する。偏差が記録されると、コントローラは加熱要素15を（線17を介して）制御し、偏差が記録された領域上の放射光26の強度を調整する。このように、温度曲線は制御され、所望の曲線にできるだけ近くなるように維持される。

【0055】チャンバの温度は、反射部30の上面39の物理的性質の変化を起こさせ、その反射率は理想的な値である1をかなり下回るかもしれない、その放射率は実質的に0を超えるかもしれない。これらの変化は、（完全でない反射率と面39からの熱放射のために）図1（a）の理想的キャビティ10とは異なったキャビティ32の振る舞いを起こさせる。これらの効果を避けるために、反射部30はウエハの温度よりも低い温度まで冷却されている。図2の実施例では水冷が用いられており、反射部30は、反射部及び反射面を冷却するために冷却液を反射部30の本体内を連続的に循環させる冷却液循環用の配管33を備えている。

【0056】加熱要素15から漏れた光26が、反射キャビティ32に入るのを防止するために、隔壁37がウエハ22の外周に沿って配置されている。これらの隔壁は、光26が、ウエハ22の下方の処理チャンバ21の部分、特に反射キャビティ32に入るのを効果的に防止する。もし加熱要素15からの光26が反射キャビティ32に入ったなら、この光はウエハ22からの熱放射に関係付けられるものでなく、それゆえ式（4）で考慮していないため、温度計測誤差の原因となる。

【0057】反射を最小にするために、ガードリング24は、加熱要素15によって生じた光26の波長を吸収する色、例えば黒または灰色を有している。隔壁37も吸収する色を有している。

【0058】加熱要素15からの光26の少なくとも一部はキャビティ32に到達することはありうる。この光はキャビティ32内で拡散して反射され、ウエハからの熱放射とともに導管36に入るかもしれない。この漏れた光26の効果は、導管がウエハの端部付近にあるときに最大となり、導管がウエハの中心付近にあるときに最小となる。これは、平均的に、ウエハの中心にある導管に到達するためには、導管がウエハの端部付近に配置さ

10

20

30

40

50

れている場合よりも、光26が多く反射しなければならないからである。反射する毎に光26の一部が吸収され、この結果、導管に到達する光は残り少なくなるからである。

【0059】導管36に入る光26が温度計測に影響を及ぼすのを防止する他の方法は、狭い帯域の波長の熱放射に感応して温度を決定する高温計38を選択し、石英窓28の下側をこの狭い波長帯以外の熱放射にとって透明な不活性材料でコートすることである。これにより、温度計測に影響する光26の部分が処理チャンバ21に入るのが防止される。別の類似の方法は、長い波長（例えば4 $\mu$ mより長い）に感応する高温計を用いている。これらの波長において石英は不透明であり、従ってこれらの波長にある光26はチャンバに入らない（しかし、この長い波長による方法は700℃を超える温度にのみ用いることができることに注意されたい。――以下で説明するように、低い温度においてはウエハは長い波長の光にとって透明になり、性能劣化につながる）。

【0060】図2の実施例においては、反射部30はウエハ22の主要な面に対して実質的に平行に示されている。この配置は、しかし、一つの実施例を示しているのにすぎず、反射部はキャビティ内のウエハからの熱放射を反射する他の形状、例えば皿形状にもしうる。

【0061】さらに、反射部と測定される物体の面性状が物体及び反射部の間のキャビティ内で熱放射を等方的に反射するように機能するかぎり、物体の面は平面である必要はない。従って、例えば、物体及び反射部の面は部分的に平行な波打った面性状であってもよい。その代わりに、反射部及び物体の面はキャビティの内面のまわりに、図1(b)に示したようにランダムに配置されていてもよい。

【0062】図3はキャビティ32を詳細に示している。図3には、ウエハ22と反射部30の一部のみが示されている。導管36及び36'の2実施例の一部、及び導管34及び34'の開放端も示されている。

【0063】前に指摘したように、ウエハ22はその処理の間に加熱される。ウエハ22は熱くなるため、その上面及び下面の両方から熱放射を放つ。典型的に、ウエハ22の下面からの放射は、反射面39及びウエハ22の間で反射され、それに伴い多くの変換を受ける。

【0064】例示のために、一つの放射光の経路が、ウエハ22の下面を離れる線40で示されている。この放射は反射面39で反射され、ウエハ22に向かって戻る。反射面は、反射率が100%に近い正反射面であるから、本質的に全ての放射が反射され、反射角は入射角に等しい。反射した放射がウエハ面22に到達したとき、ある量の放射が点42においてウエハ22によって吸収される。のこりの放射は、例えば線44及び46で表される異なる光線のように、ウエハの下面から拡散して反射される。（ウエハの下側は、典型的にはエッチン

グされ、それゆえある波長に対する拡散鏡(diffuse reflector)になる。) 光線46は、再び、反射面39によって反射され、ウエハ22に戻り、例えばほとんどすべてが点48においてウエハ22に吸収される。線44によって表される光線は、反射面39によって同様に反射され、点50においてウエハ22によって一部のみが吸収され、線52で表される残りの放射は、反射キャビティ32の境界を離れるまで連続的な反射と吸収を続ける。

【0065】従って、図3の配置における熱放射の反射と再吸収のパターンは、図1(a)を参照して上で説明した理想的な無限平行板の場合に似ている。相違点は、ウエハ及び反射部の端部から放射が失われることによって生じる端部の効果である。しかし、反射部の幅がウエハ及び反射部の距離よりも実質的に大きいなら、反射部及びウエハの中心付近における反射の回数は図1(a)の理想的配置の場合に近くなる。従って、ウエハの中心付近では、端部の効果は無視することができ、この領域においてはキャビティ32内の放射はウエハの放射率に実質的に依存しなくなる。

【0066】高温計38を設計する際に必要なことは、“黒体”すなわち図4に示されたような放射率1の物体の放射のスペクトル曲線(spectral radiance curves)を参照することによりもっともうまく説明される。キャビティ32内の放射は黒体の放射に類似しているため、図4は、放射スペクトルとキャビティ32内の放射の波長との関係をも示している。それゆえ、この図はウエハ22の温度を測定するのに好適な高温計を選択する際に考慮すべきことを理解するのに有用である。高温計は、熱放射の、ウエハ22が透明にならないような波長を測るべきである。これは、図1(a)の理想的なモデルにおいては、上部壁11及び下部壁12の両方が透過率を有しておらず、それゆえ上部壁11で発生したキャビティ10内の全ての熱放射はキャビティ内で反射されるか上部壁11で再吸収され、さらに、他の放射はキャビティ10内に入らないと想定しているからである。ウエハ22が透明になる波長では、これらの仮定の両方とも成立せず、キャビティ32は図1(a)の理想的なキャビティ10によってはモデル化できない。

【0067】室温においては、ウエハは1.1 $\mu$ mより長い波長の光に対しては透明である。温度が上昇するに従って、ウエハはもっと長い波長に対して不透明になり、700℃においてウエハは関心のあるすべての波長において不透明になる。従って、計測波長を選択することは、処理温度に依存する。もし処理温度が実質的に700℃より下であるなら、高温計は1.1 $\mu$ mより短い波長を計測しなければならない。もしもっと高い処理温度が用いられるなら、もっと長い波長が計測されうる。

(非常に低い処理温度(例えば600°K(327℃))においては、図4の曲線58は“黒体”放射スベ

10

20

30

40

50

クトルの少量のみが1.1  $\mu\text{m}$ よりも短いことに注意されたい。しかし、典型的なウエハは低温においては長い波長に対して透明になるので、高温計は1.1  $\mu\text{m}$ よりも短い波長を計測できるのみである。この結果、600°Kよりも低い温度においては、上記方法によって典型的なウエハの温度を計測するのに十分な量の放射を集めるのは困難になりうる。) 900°Cと1350°Cとの間の温度で作用する処理に好適な一つの設計例は、0.9~1.0  $\mu\text{m}$ の範囲にある放射に感応するソリッドステートの(solid-state)の高温計38、例えば100-S8MS-B-8CV電子回路(electronics box)と組み合わせられた900-LP-6.35Cセンサを用いている。これらは両方とも、前述の住所のLuxtron Corporation-Accufiber Divisionから入手することができる。図4の(1000°Kすなわち1273°Cにおける放射を示す)曲線60からわかるように、この温度範囲においては、0.9~1.0  $\mu\text{m}$ の間の実質的な放射があり、良好な信号強度及び信号-ノイズ比が提供される。

【0068】上記の考察はウエハ材料及び動作温度に依存し、好適な高温計の選択はそれゆえこれらの要因に依存する。

【0069】上記温度測定システムの正確さ及び再現性(repeatability)は、以下の手順により実験的に評価された。おもて面に同一の処理が施され裏面に異なる処理が施された4グループのウエハが用意された。第1グループは、付加的な膜のない標準的な”エッチトバック”

\* (etched back) ”面を有している。第2グループは、付加的な膜のない磨かれた裏面を有している。第3グループは、500 nmの熱酸化物に覆われた”エッチトバック”面を有している。第4グループは、1000 nmの熱酸化物に覆われた”エッチトバック”面を有している。放射率は面あらさ及び酸化物膜厚の両方の関数であるから、これらの裏面の各々は他のものとは実質的に異なる放射率(e)を有している。

【0070】標準的な温度測定技術(高温計)を評価するために、ウエハは面を下にして処理チャンバ内に配置され、加熱要素が裏面を放射した。高温計も裏面を観測した。上記の温度測定技術の評価するために、ウエハは面を上にしてチャンバ内に配置され、温度測定が裏面で行われる間、加熱要素は前面を放射した。

【0071】すばやい熱酸化物が約1100°Cにおいて60秒で各ウエハで成長した。説明したタイプの一つの導管及び高温計が温度を測定するために用いられ、上記のタイプのフィードバックコントローラが温度を処理の間中、所定の値1100°Cに制御するために用いられた。その結果形成された酸化物の厚さがエリプソメータ(ellipsometer)によって測定された。処理の再現性は、上記の新しい温度測定技術を用いることにより実質的に向上した。成長した酸化物層の厚さの偏差は、以下の表に示すように6.2 nmから0.3 nmに減少した。

【0072】

【表1】

裏面	酸化物厚さー 標準的な方法	酸化物厚さー 新しい方法
エッチングしたもの	10.8 nm	11.0 nm
磨いたもの	12.8 nm	10.8 nm
500 nmの酸化物	7.6 nm	11.1 nm
1000 nmの酸化物	6.6 nm	10.8 nm

【0073】この発明を半導体ウエハの温度測定について示し説明してきたが、この発明の形態、詳細や応用について種々の代替や変形が可能であることは、当業者には理解されるであろう。従って、特許請求の範囲は、この発明の真髄及び範囲に入りうるすべての代替や変形をカバーすることが意図されている。

【0074】

【発明の効果】この発明によれば、物体の温度を複数の点において非接触で測定する簡単な方法を得ることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】(a)は平行板キャビティの断面図であり、こ

の発明の原理を図示するものである。(b)は一般化したキャビティの断面図であり、この発明の原理を図示するものである。

【図2】半導体処理チャンバの内部の一部断面図であり、この発明を図示する。

【図3】図2のチャンバの一部の拡大図であり、ウエハ及び反射部の部品を示しており、ウエハ22及び反射部30の間のキャビティ内の熱放射の反射を示している。

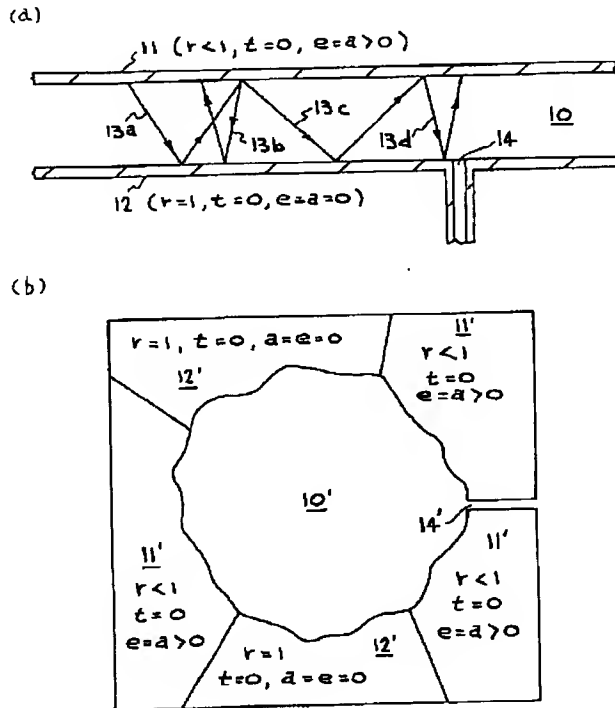
【図4】いくつかの異なる温度における吸収率 $a=1$ 及び放射率 $e=1$ の物体(すなわち、”黒体”)について、対数目盛の波長に対する放射のスペクトルをプロットしたグラフである。

## 【符号の説明】

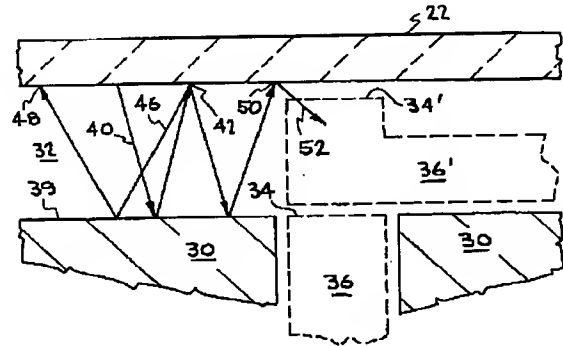
10、32…反射キャビティ、15…加熱要素、16…  
コントローラ、22…ウエハ（物体）、30…反射部、

36、36'…導管、37…隔壁、38…高温計、39  
…反射面。

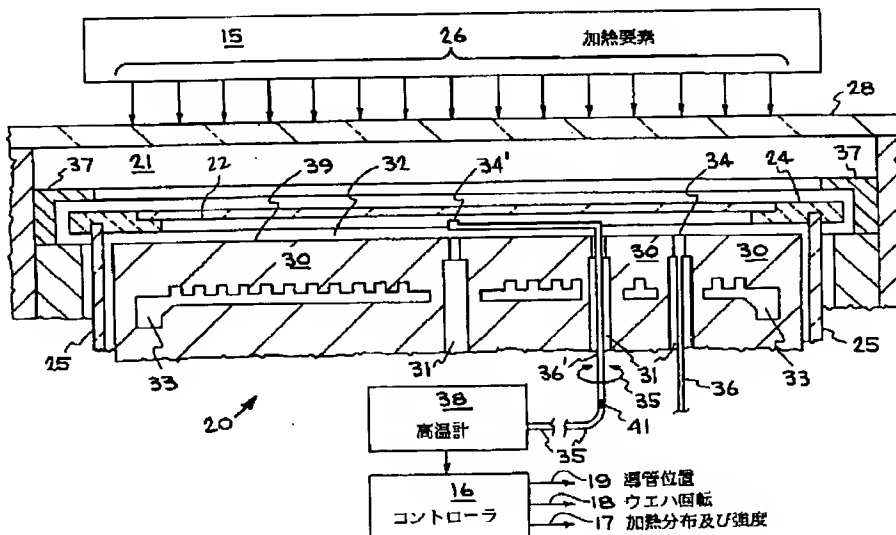
【図1】



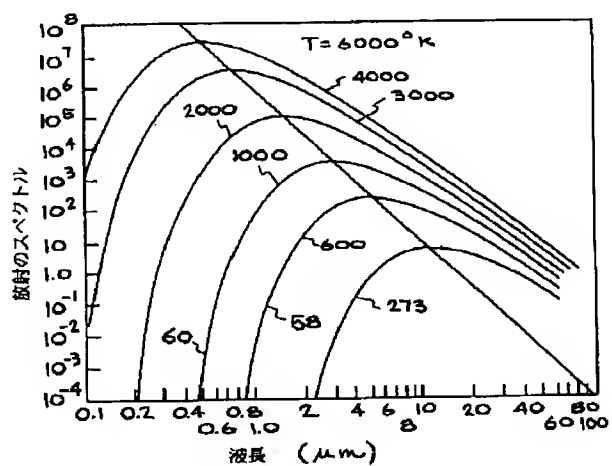
【図3】



【図2】



【図4】



フロントページの続き

(72)発明者 ゲリー イー. マイナー  
 アメリカ合衆国, カリフォルニア州  
 94555, フレモント, ヒルダスー テ  
 ラス 4974